

PERANCANGAN TRANSMISI DC PADA SALURAN BAWAH LAUT

Dedy Sastra Firman B.I, Petrus Tahir Ursam
Jurusan Teknik Elektro – Fakultas Teknik
Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya – Jakarta

ABSTRAK

Berkat perkembangan komponen elektronika daya, maka mulai digunakan transmisi dc untuk mentransmisi energi listrik. Transmisi dc lebih menguntungkan dari transmisi ac karena membutuhkan dua kabel penghantar untuk sistem dc *linkbipolar* dan satu kabel penghantar untuk sistem dc *link monopolar*. Untuk transmisi dc yang menggunakan sistem dc link terdiri dari dua konverter yaitu *rectifier* dan *inverting*. Di Indonesia, kondisi geografis yang terbagi atas beberapa pulau mendukung dibuat saluran transmisi dc bawah laut. Transmisi dc bawah laut digunakan agar pulau-pulau yang kekurangan daya listrik bisa mendapat tambahan daya listrik dari pulau yang kelebihan daya listrik. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk merancang sistem transmisi dc pada saluran transmisi bawah laut yang menghubungkan listrik antar pulau. Transmisi DC yang digunakan terdiri dari mode *rectifying* di bagian sisi pengirim dan *inverting* di bagian sisi penerima. Dari perhitungan diketahui besar tegangan dc pada saluran transmisi ditentukan oleh sudut picu *rectifier* yang diberikan.

Kata kunci: transmisi dc bawah laut, *rectifier*, *inverting*, *monopolar link*.

ABSTRACT

The development of power electronics components created the dc transmission which began to be used to transmit electrical energy. DC transmission is more profitable than ac transmission because it requires two-cables for bipolar system link cable and a cable for monopolar link system. For the dc transmission system consists of two dc link converters rectifier and inverting. In Indonesia, which is an archipelago island, supports the underwater dc transmission line to be applied. Underwater dc transmission is used to provide additional electricity power to islands that have insufficient power from the excess power island. Therefore, this study was conducted to design a dc transmission system underwater transmission line that connects electricity between islands. DC transmission consisting of rectifying mode used on the sending side and inverting mode on the receiving side. According to the calculation, the great dc voltage on the transmission line is determined by the angle rectifier trigger.

Keyword: dc transmission underwater, *rectifier*, *inverting*, *monopolar link*.

PENDAHULUAN

Sistem transmisi energi listrik yang umumnya digunakan adalah transmisi ac. Tetapi berkat perkembangan komponen elektronika daya, maka mulai digunakan transmisi dc. Transmisi dc

lebih menguntungkan dari transmisi ac karena membutuhkan dua kabel penghantar untuk sistem bipolar dan satu kabel penghantar untuk sistem monopolar. Di Indonesia, kondisi geografis yang terbagi atas beberapa

pulau mendukung dibuat saluran transmisi dc bawah laut.

Transmisi dc bawah laut digunakan agar pulau-pulau yang kekurangan daya listrik bisa mendapat tambahan daya listrik dari pulau yang kelebihan daya listrik seperti pulau Sumatra dan pulau Kalimantan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk merancang sistem transmisi dc pada saluran transmisi bawah laut yang menghubungkan listrik antar pulau.

TEORI DASAR

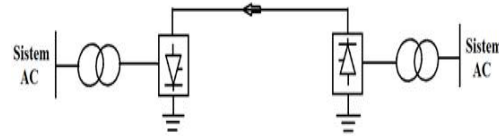
A. Saluran Transmisi Arus Searah

Saluran transmisi arus searah dapat diklasifikasi menjadi 3 menurut *DC link*:

1. *Monopolar link*
2. *Bipolar link*
3. *Homopolar link*

A.1 *Monopolar link*

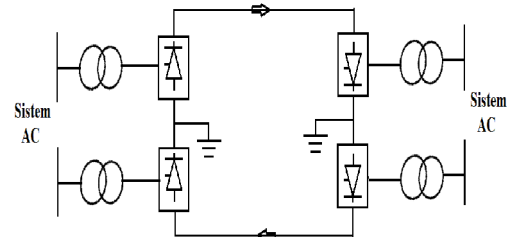
Monopolar link adalah sistem dc *link* yang menggunakan satu konduktor dengan arus balik melalui tanah atau air laut. Satu konduktor pada *monopolar link* mengalirkan tegangan dengan polaritas positif atau polaritas negatif. *Monopolar link* sering digunakan untuk transmisi saluran bawah laut karena jarang terjadi kerusakan pada konduktor yang tertanam permanen di bawah laut. Hal ini menyebabkan tidak menggunakan dua konduktor seperti *bipolar link* atau *homopolar link* yang bertujuan apabila satu konduktor mengalami gangguan konduktor yang lain masih bisa beroperasi. Dilihat dari segi ekonomis *monopolar link* lebih murah bila dibandingkan dengan sistem *bipolar link* dan *homopolar link* karena menggunakan satu konduktor dan memerlukan dua konverter. Sistem *monopolar link* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. HVDC *monopolar link*

A.2 *Bipolar link*

Bipolar link adalah sistem dc *link* yang menggunakan dua konduktor yang mengalirkan tegangan dengan polaritas positif dan polaritas negatif. Setiap terminal pada sistem *bipolar link* memiliki dua konverter yang terhubung seri dan tidak ada arus ke tanah. Namun, bila salah satu konduktor mengalami gangguan maka konduktor yang lain dapat beroperasi dengan arus balik melalui tanah. Hal ini menjadi kelebihan dari sistem *bipolar link* yang mampu beroperasi dengan arus balik melalui tanah apabila salah satu konduktor mengalami gangguan. Dilihat dari sisi ekonomis sistem *bipolar link* lebih mahal daripada sistem *monopolar link* karena menggunakan dua konduktor dan 4 konverter. Sistem *bipolar link* dapat dilihat pada Gambar 2.

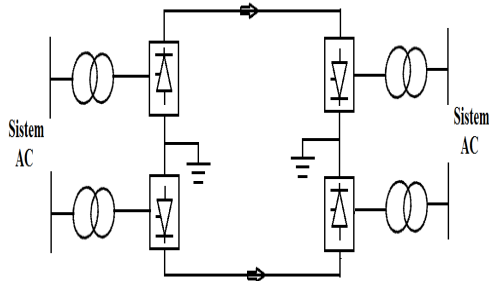


Gambar 2. HVDC *bipolar link*

A.3. *Homopolar link*

Homopolar link adalah sistem dc *link* yang menggunakan dua atau lebih konduktor yang mengalirkan tegangan dengan polaritas sejenis yaitu polaritas positif atau polaritas negatif. Setiap terminal pada sistem *homopolar link* memiliki dua konverter yang terhubung seri dengan arus kembali dari masing-masing terminal melalui tanah. Jika

salah satu konduktor mengalami gangguan, maka terminal yang lain dapat beroperasi dengan arus kembali melalui tanah. Dilihat dari sisi ekonomis sistem *homopolar link* lebih mahal daripada sistem *monopolar link* karena menggunakan dua atau lebih konduktor dan konverter. Sistem *homopolar link* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. HVDC *homopolar link*

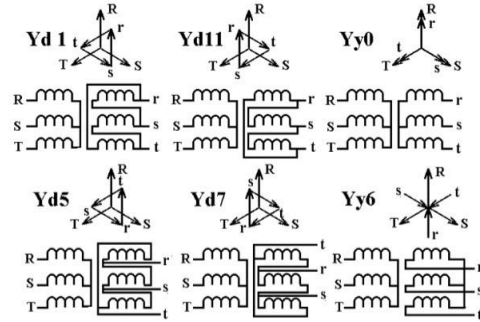
B. Transformator

Transformator atau sering disebut dengan trafo adalah salah satu mesin listrik yang berfungsi untuk menurunkan atau menaikkan besar tegangan dan arus dengan suatu nilai perbandingan antara lilitan primer dengan lilitan sekunder. Berdasarkan jumlah fasanya, trafo dapat dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Trafo satu fasa
2. Trafo tiga fasa

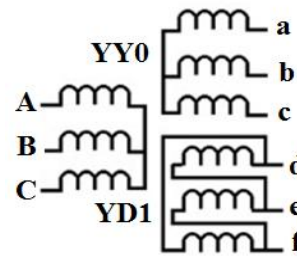
Pada sistem yang akan dibahas, trafo yang digunakan adalah trafo tiga fasa yang berada di bagian sisi pengirim dan sisi penerima. Trafo tiga fasa pada sisi pengirim terdiri atas tiga belitan primer dan dua belitan sekunder perfasayang terhubung Y-Y dan Y- Δ sedangkan trafo tiga fasa pada sisi penerima terdipri atas tiga belitan sekunder dan dua belitan primer per fasa yang terhubung Y- Δ dan Y-Y. Dalam hubungan Y-Y dan Y- Δ akan mengalami pergeseran sudut fasa antara tegangan di sisi primer dan sisi sekunder. Pergeseran sudut fasa pada trafo ini dikenal dengan sistem bilangan

jam (*vector group*). Gambar 4 dapat dilihat pergeseran sudut fasa yang dinyatakan dengan bilangan jam berdasarkan hubung Y-Y dan Y- Δ .



Gambar 4. Bilangan jam transformator tiga fasa

Trafo tiga fasa pada sisi penerima yang terhubung dengan *rectifier* menggunakan hubungan belitan YY0 dan Y Δ 1. Hubungan YY0 dan Y Δ 1 bertujuan untuk menghasilkan pergeseran sudut fasa sebesar 30° sehingga dapat dihasilkan tegangan keluaran *rectifier* berupa gelombang dua belas pulsa.



Gambar 5. Hubungan trafo tiga fasa di sisi pengirim

Karena antara YY0 dan Y Δ 1 memiliki perbandingan sebesar $\sqrt{3}$ maka YY0

harus menggunakan perbandingan trafo yaitu $1/\sqrt{3}$ dari perbandingan trafo Y Δ 1. Berikut ini tegangan antar fasa masing-masing hubungan trafo YY0 dan Y Δ 1: Tegangan antar fasa trafo hubungan YY0:

$$V_{ab}(\omega t) = V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \quad (1)$$

$$V_{ac}(\omega t) = V_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \quad (2)$$

$$V_{bc}(\omega t) = V_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

$$V_{ba}(\omega t) = V_m \sin\left(\omega t - \frac{5\pi}{6}\right) \quad (4)$$

$$V_{ca}(\omega t) = V_m \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{6}\right) \quad (5)$$

$$V_{cb}(\omega t) = V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

$$\text{Tegangan antar fasa trafo hubung Y}\Delta 1$$

$$V_{de}(\omega t) = V_m \sin(\omega t) \quad (7)$$

$$V_{df}(\omega t) = V_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right) \quad (8)$$

$$V_{ef}(\omega t) = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (9)$$

$$V_{ed}(\omega t) = V_m \sin(\omega t + \pi) \quad (10)$$

$$V_{fd}(\omega t) = V_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (11)$$

$$V_{fe}(\omega t) = V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) \quad (12)$$

Keterangan:

V_m = Tegangan maksimum antar fasa

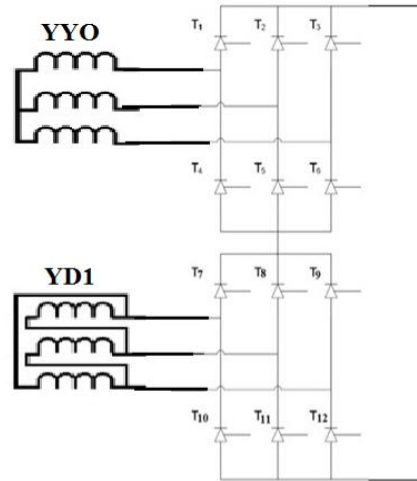
C. DCLink

DCLink merupakan suatu rangkaian elektronika daya yang digunakan untuk menyalurkan daya. Rangkaian ini terdiri dari 2 buah konverter, yaitu *rectifier* dan *rectifier* yang berfungsi sebagai *inverter* (*inverting*).

C.1 Rectifier

Rectifier adalah sebuah konverter yang berfungsi untuk mengubah tegangan bolak-balik menjadi tegangan searah. *Rectifier* pada sistem ini menggunakan dua buah *rectifier* enam pulsa yang terhubung seri membentuk *rectifier* dua belas pulsa dengan rangkaian. Pada *rectifier* ini digunakan *thyristor* karena waktu konduksinya dapat dikontrol, sehingga besar tegangan keluaran *rectifier* dapat diatur

besarnya melalui sudut picu (α) yang diberikan.



Gambar 6 Rangkaian *rectifier* 6 pulsa terhubung seri membentuk *rectifier* 12 pulsa

Urutan Picu : $T_1 - T_7 - T_6 - T_{12} - T_2 - T_8 - T_4 - T_{10} - T_3 - T_9 - T_5 - T_{11}$ dst.

Urutan Konduksi : $T_1 T_{11} T_9 T_5 - T_1 T_{11} T_7 T_5 - T_1 T_{11} T_7 T_6 - T_1 T_{12} T_7 T_6 - T_2 T_{12} T_7 T_6 - T_2 T_{12} T_8 T_6 - T_2 T_{12} T_8 T_4 - T_2 T_{10} T_8 T_4 - T_3 T_{10} T_8 T_4 - T_3 T_{10} T_9 T_4 - T_3 T_{10} T_9 T_5 - T_3 T_{11} T_9 T_5$ - dst.

$$V_{dc} = \frac{p \cdot V_{m1}}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{p}\right) \cos(\alpha) \quad (13)$$

$$V_{dc} = \frac{12 \cdot 2 \cdot \sin(75^\circ) V_m}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12}\right) \cos(\alpha)$$

$$V_{dc} = \frac{12 \cdot 2 \cdot \sin(75^\circ) \cdot \sqrt{3} \cdot V_s}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{12}\right) \cos(\alpha)$$

$$V_{dc} = 3,308 \cdot V_s \cdot \cos(\alpha) \quad (14)$$

Keterangan :

P = Jumlah pulsa pada *rectifier*,

V_{dc} = Tegangan DC keluaran *rectifier*,

V_m = Tegangan maksimum antar fasa masukan *rectifier*,

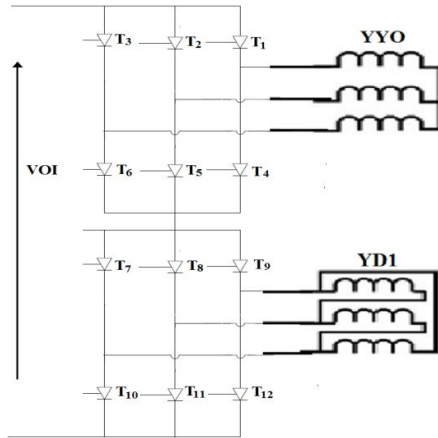
V_{m1} = Tegangan maksimum keluaran *rectifier* dua belas pulsa,

V_s = Tegangan maksimum per fasa,

α = Sudut tunda konduksi *thyristor* pada *rectifier*.

C.2 Inverter

Rangkaian *inverting* sama seperti *rectifier* dengan pemasangan *thyristor* terbalik dengan *rangesudut* picu α antara $90^\circ - 180^\circ$ atau menggunakan $\beta = 180^\circ - \alpha$ sehingga sudut β antara $0^\circ - 90^\circ$. Konverter ini menerima daya dan berfungsi sebagai *inverter* (*inversion*).



Gambar 7 Rangkaian ekivalen *inverting*

Urutan Picu : $T_1 - T_7 - T_6 - T_{12} - T_2 - T_8 - T_4 - T_{10} - T_3 - T_9 - T_5 - T_{11}$ dst.

Urutan Konduksi : $T_1 T_{11} T_9 T_5 - T_1 T_{11} T_7 T_5 - T_1 T_{11} T_7 T_6 - T_1 T_{12} T_7 T_6 - T_2 T_{12} T_7 T_6 - T_2 T_{12} T_8 T_6 - T_2 T_{12} T_8 T_4 - T_2 T_{10} T_8 T_4 - T_3 T_{10} T_8 T_4 - T_3 T_{10} T_9 T_4 - T_3 T_{10} T_9 T_5 - T_3 T_{11} T_9 T_5$ - dst.

$$V_{dc2} = \frac{p \cdot V_{m1}}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{p}\right) \cos(\beta)$$

$$V_{dc2} = \frac{12.2 \cdot \sin(75^\circ) V_m}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12}\right) \cos(\beta)$$

$$V_{dc2} = \frac{12.2 \cdot \sin(75^\circ) \cdot \sqrt{3} \cdot V_s}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{12}\right) \cos(\beta)$$

$$V_{dc2} = 3,308 \cdot V_s \cdot \cos(\beta) \quad (15)$$

D. Deret Fourier

Suatu fungsi yang periodik dapat dinyatakan dalam sebuah Deret Fourier yang didefinisikan sebagai berikut:

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \{A_n \cdot \cos n \cdot \omega_0 \cdot t + B_n \cdot \sin n \cdot \omega_0 \cdot t\} \quad (16)$$

$$A_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (17)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n \cdot \omega_0 \cdot t dt \quad (18)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n \cdot \omega_0 \cdot t dt \quad (19)$$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (20)$$

$$V_0(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \{C_n \sin(n \cdot \omega_0 \cdot t + \phi_n)\} \quad (21)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \frac{A_n}{B_n} \quad (22)$$

Keterangan:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

T = periode gelombang

ANALISIS SISTEM

A. Data Jaringan

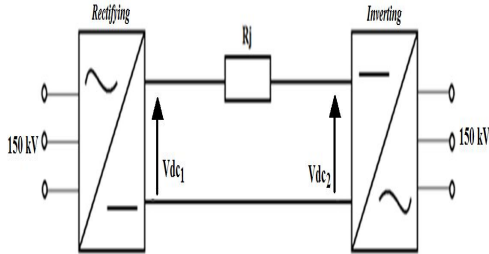
Pada sistem ini menggunakan transmisi HVDC *monopolar link* yang terdiri dari satu konduktor dengan tegangan polaritas positif dan arus balik ditanahkan. HVDC *monopolar link* ini menghubungkan listrik dari Palembang ke Bangka melalui saluran bawah laut dengan tegangan transmisi dc 350 kV. Berikut ini data jaringan transmisi yang akan dianalisis:

1. Jenis DC-link : *monopolar link*
2. Panjang transmisi : 50 km
3. Resistansi jaringan (R_j): 0,011 Ω/km
= 0,55 Ω
4. Daya yang dikirim (P): 1000 MW
5. Trafo 1: 20kV/150kV 1200MVA
6. Trafo 2 : 150kV/20kV 1200MVA

Pada perancangan ini akan dikirim daya sebesar 1000 MW dengan menggunakan dc link yang terdiri dari *rectifier* dan *inverting* dengan tegangan transmisi sebesar 350 kV. Tegangan masukan dari *rectifier* diambil dari tegangan jaringan yang sudah dinaikkan terlebih dahulu oleh trafo 1 yaitu sebesar 150 kV dan dengan mengatur sudut picu (α) pada *rectifier* dapat diperoleh tegangan transmisi dc yaitu V_{dc1} sebesar 350 kV. Setelah tegangan dc yang membawa daya tiba

di bagian *inverting* maka dapat dihitung besar sudut picu (β) pada *inverting*.

B. Analisis Sistem Pada Sisi Rectifier



Gambar 8 Rangkaian ekivalen rectifier – inverting

Pada Gambar 8 menunjukkan tegangan masukan *rectifier* sebesar 350 kV. Berdasarkan Persamaan 2 dapat dihitung besar sudut picu (α) untuk menghasilkan tegangan V_{dc1} sebesar 350 kV.

$$350000 = 3,308 \cdot \frac{150000\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\alpha)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{350000\sqrt{3}}{3,308 \cdot 150000\sqrt{2}}$$

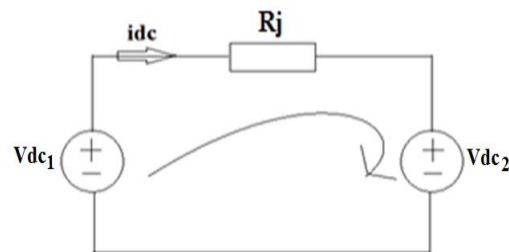
$$\cos(\alpha) = 0,8638$$

$$\alpha = \cos^{-1}(0,8638)$$

$$\alpha = 30,244^\circ$$

C. Analisis Sistem pada Saluran Transmisi

Pada sistem yang dianalisis menggunakan jenis transmisi dc *monopolar link*. Gambar 9 merupakan rangkaian ekivalen transmisi dc *monopolar link*.



Gambar 9 Rangkaian ekivalen transmisi dc *monopolar link*

Dari daya yang diperoleh dari data jaringan dapat diperoleh persamaan untuk menghitung arus I_{dc} yang mengalir pada saluran transmisi.

$$I_{dc} = \frac{P}{V_{dc1}} \quad (23)$$

$$I_{dc} = \frac{1000 \text{ MW}}{350000}$$

$$I_{dc} = 2857,142 \text{ A}$$

Berdasarkan Gambar 9 dapat diperoleh persamaan (24).

$$V_{dc1} = I_{dc} \cdot R_j + V_{dc2} \quad (24)$$

$$350000 = 2857,142 \cdot 0,55 + V_{dc2}$$

$$V_{dc2} = 348424,571 \text{ V}$$

Berdasarkan nilai V_{dc2} yang diperoleh dapat diketahui daya yang tiba di bagian *inverting* adalah sebagai berikut:

$$P = V_{dc2} \cdot I_{dc}$$

$$P = 348424,571 \cdot 2857,142$$

$$P = 995,5 \text{ MW}$$

D. Analisis Sistem pada Sisi Inverting

Berdasarkan V_{dc2} yang diperoleh dapat dihitung besar sudut picu (β) menggunakan Persamaan 3.

$$348424,571 = 3,308 \cdot \frac{150000\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\beta)$$

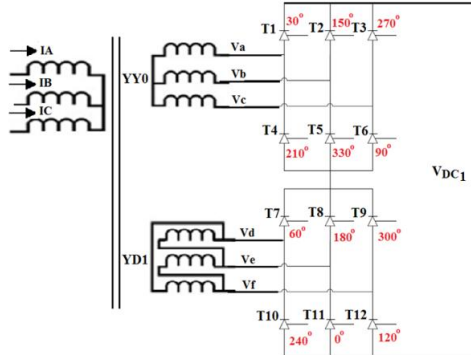
$$\cos(\beta) = \frac{348424,571\sqrt{3}}{3,308 \cdot 150000\sqrt{2}}$$

$$\cos(\beta) = 0,86$$

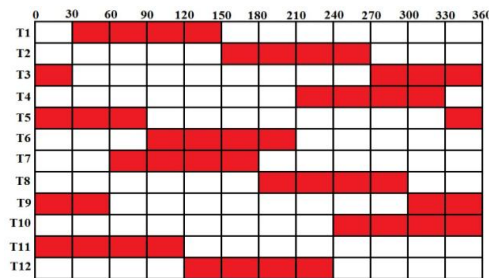
$$\beta = \cos^{-1}(0,86)$$

$$\beta = 30,682^\circ$$

E. Analisis arus sekunder trafo 20kV/150kV



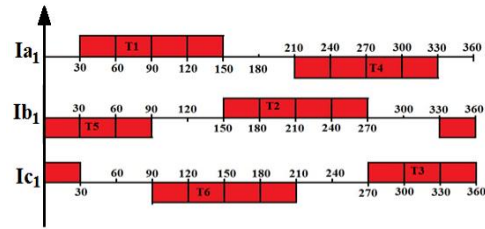
Gambar 10 Rangkaian ekivalen trafo 20/150 kV terhubung dengan *rectifier*



Gambar 11 Urutan konduksi *thyristor rectifier*

Urutan konduksi:

1. T1 – T11 – T9 – T5 → 30 – 60
2. T1 – T11 – T7 – T5 → 60 – 90
3. T1 – T11 – T7 – T6 → 90 – 120
4. T1 – T12 – T7 – T6 → 120 – 150
5. T2 – T12 – T7 – T6 → 150 – 180
6. T2 – T12 – T8 – T6 → 180 – 210
7. T2 – T12 – T8 – T4 → 210 – 240
8. T2 – T10 – T8 – T4 → 240 – 270
9. T3 – T10 – T8 – T4 → 270 – 300
10. T3 – T10 – T9 – T4 → 300 – 330
11. T3 – T10 – T9 – T5 → 330 – 0
12. T3 – T11 – T9 – T5 → 0 – 30



Gambar 12 Arus pada sekunder trafo Y

Dari Gambar 12 dihitung besar I_{a1} dengan menggunakan deret fourier dari persamaan (6) dan (7) sebagai berikut:

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n \cdot \omega t \, dt$$

$$A_n = \frac{2}{T} \cdot Idc \left(\int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5}{12}T} \cos n \frac{2\pi}{T} d(t) - \int_{\frac{7}{12}T}^{\frac{11}{12}T} \cos n \frac{2\pi}{T} d(t) \right)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \cdot Idc \left(\frac{T}{n \cdot 2\pi} \cdot \sin n \frac{2\pi}{T} (t) \frac{5}{12}T - \frac{T}{n \cdot 2\pi} \cdot \sin n \frac{2\pi}{T} (t) \frac{11}{12}T \right)$$

$$A_n = 2 \cdot Idc \left(\frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\sin n \left(\frac{5}{6} \pi \right) - \sin n \left(\frac{\pi}{6} \right) \right) \right)$$

$$- \frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\sin n \left(\frac{11}{6} \pi \right) - \sin n \left(\frac{7}{6} \pi \right) \right)$$

$$A_n = 2 \cdot \text{Idc} \left(\frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\sin n \left(\frac{5}{6} \pi \right) \right) - \frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\sin n \left(\frac{\pi}{6} \right) \right) - \frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\sin n \left(\frac{11}{6} \pi \right) \right) + \frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\sin n \left(\frac{7}{6} \pi \right) \right) \right)$$

Untuk $n = 1$

$$A_1 = 0$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n \cdot \omega t \, dt$$

$$B_n = \frac{2}{T} \cdot \text{Idc} \left(\int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5}{12}T} \sin n \frac{2\pi}{T} d(t) - \int_{\frac{7}{12}T}^{\frac{11}{12}T} \sin n \frac{2\pi}{T} d(t) \right)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \cdot \text{Idc} \left(-\frac{T}{n \cdot 2\pi} \cdot \text{scos} n \frac{2\pi}{T} (t) \Big|_{\frac{T}{12}}^{\frac{5}{12}T} + \frac{T}{n \cdot 2\pi} \cdot \text{cos} n \frac{2\pi}{T} (t) \Big|_{\frac{7}{12}T}^{\frac{11}{12}T} \right)$$

$$B_n = 2 \cdot \text{Idc} \left(-\frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\cos n \left(\frac{5}{6} \pi \right) - \cos n \left(\frac{\pi}{6} \right) \right) + \frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\cos n \left(\frac{11}{6} \pi \right) - \cos n \left(\frac{7}{6} \pi \right) \right) \right)$$

$$B_n = 2 \cdot \text{Idc} \left(-\frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\cos n \left(\frac{5}{6} \pi \right) \right) + \frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\cos n \left(\frac{\pi}{6} \right) \right) + \frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\cos n \left(\frac{11}{6} \pi \right) \right) - \frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\cos n \left(\frac{7}{6} \pi \right) \right) \right)$$

Untuk $n = 1$

$$B_1 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \text{Idc} = 1,103 \cdot \text{Idc}$$

$$C_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2}$$

$$C_1 = 1,103 \cdot \text{Idc}$$

$$C_1 = 3150,4$$

$$I_{a1} = \frac{C_1}{\sqrt{2}}$$

$$I_{a1} = 2227,7 \text{ A}$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{A_1}{B_1}$$

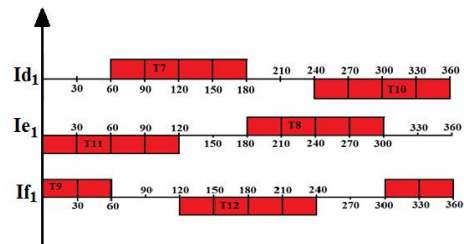
$$\phi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{0}{1,103} \right) = 0^\circ$$

Dengan mengetahui nilai I_{a1} maka dapat diketahui daya semu (S) pada sekunder trafo Y sebagai berikut:

$$S_Y = \sqrt{3} \cdot V_{L-L} \cdot I_{a1}$$

$$S_Y = \sqrt{3} \cdot 150000 \cdot 2227,7 \text{ A}$$

$$S_Y = 578,7 \text{ MVA}$$



Gambar13 Arus pada sekunder trafo Δ

Dari Gambar 13 dapat dihitung besar arus I_{d1} dengan menggunakan deret fourier dari persamaan (6) dan (7) sebagai berikut :

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n \cdot \omega t \, dt$$

$$A_n = \frac{2}{T} \cdot \text{Idc} \left(\int_{\frac{T}{6}}^{\frac{T}{2}} \cos n \frac{2\pi}{T} d(t) - \int_{\frac{2}{3}T}^T \cos n \frac{2\pi}{T} d(t) \right)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \cdot \text{Idc} \left(\frac{T}{n \cdot 2\pi} \cdot \sin n \frac{2\pi}{T} (t) \frac{T}{6} - \frac{T}{n \cdot 2\pi} \cdot \sin n \frac{2\pi}{T} (t) \frac{T}{3} \right)$$

$$A_n = 2 \cdot \text{Idc} \left(\frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\sin n(\pi) - \sin n\left(\frac{\pi}{3}\right) - \frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\sin n(2\pi) - \sin n\left(\frac{4}{3}\pi\right) \right) \right) \right)$$

$$A_n = 2 \cdot \text{Idc} \left(\frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\sin n(\pi) - \frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\sin n\left(\frac{\pi}{3}\right) - \frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\sin n(2\pi) + \frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\sin n\left(\frac{4}{3}\pi\right) \right) \right) \right) \right) \right)$$

Untuk $n = 1$

$$A_1 = -\frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \text{Idc} = -0,551 \cdot \text{Idc}$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n \cdot \omega t \, dt$$

$$B_n = \frac{2}{T} \cdot \text{Idc} \left(\int_{\frac{T}{6}}^{\frac{T}{2}} \sin n \frac{2\pi}{T} d(t) - \int_{\frac{2}{3}T}^T \sin n \frac{2\pi}{T} d(t) \right)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \cdot \text{Idc} \left(-\frac{T}{n \cdot 2\pi} \cdot \cos n \frac{2\pi}{T} (t) \frac{T}{6} + \frac{T}{n \cdot 2\pi} \cdot \cos n \frac{2\pi}{T} (t) \frac{T}{3} \right)$$

$$B_n = 2 \cdot \text{Idc} \left(-\frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\cos n(\pi) - \cos n\left(\frac{\pi}{3}\right) + \frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\cos n(2\pi) - \cos n\left(\frac{4}{3}\pi\right) \right) \right) \right)$$

$$B_n = 2 \cdot \text{Idc} \left(-\frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\cos n(\pi) + \frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\cos n\left(\frac{\pi}{3}\right) + \frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\cos n(2\pi) - \frac{1}{n \cdot 2\pi} \cdot \left(\cos n\left(\frac{4}{3}\pi\right) \right) \right) \right) \right) \right)$$

Untuk $n = 1$

$$B_1 = \frac{3}{\pi} \cdot \text{Idc} = 0,955 \cdot \text{Idc} = 2857,142$$

$$C_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2}$$

$$C_1 = 1,103 \cdot \text{Idc}$$

$$C_1 = 3150,4$$

$$\text{Id}_1 = \frac{C_1}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Id}_1 = 2227,7 \, \text{A}$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{A_1}{B_1}$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{-0,551}{0,955} \right) = -30^\circ$$

Dengan mengetahui nilai Id_1 maka dapat diketahui daya semu (S) pada sekunder trafo Δ sebagai berikut:

$$S_\Delta = \sqrt{3} \cdot V_{L-L} \cdot \text{Id}_1$$

$$S_\Delta = \sqrt{3} \cdot 150000 \cdot 2227,7$$

$$S_\Delta = 587,7 \, \text{MVA}$$

$\bar{S}_{\text{Total}} = \bar{S}_Y + \bar{S}_\Delta$, dengan $\bar{S}_Y + \bar{S}_\Delta$ berbeda 30° .

$$\bar{S}_{\text{Total}} = \sqrt{587,7^2 + 587,7^2 + 2 \cdot (587,7)^2 \cdot \cos(30^\circ)}$$

$$\bar{S}_{\text{Total}} = 1118 \text{ MVA}$$

Dari nilai $\bar{S}_{\text{Total}} = 1118 \text{ MVA}$ maka dapat diketahui faktor daya ($\cos \varphi$) trafo sebagai berikut:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\bar{S}_{\text{Total}}}$$

$$\cos \varphi = \frac{1000}{1118}$$

$$\cos \varphi = 0,894$$

F. Analisis Arus Primer Trafo 150kV/20kV

Pada sistem ini menggunakan rangkaian *rectifier* dan *inverting* yang sama maka hasil deret fourier dari I_{a1} dan I_{d1} pada bagian primer trafo 150kV/20kV sama dengan bagian sekunder trafo 20kV/150kV.

Dengan mengetahui nilai $I_{a1} = 2227,7 \text{ A}$ maka dapat diketahui daya semu (S) pada primer trafo Y sebagai berikut:

$$S_Y = \sqrt{3} \cdot V_{L-L} \cdot I_{a1}$$

$$S_Y = \sqrt{3} \cdot 150000 \cdot 2227,7 \text{ A}$$

$$S_Y = 578,7 \text{ MVA}$$

Dengan mengetahui nilai $I_{d1} = 2227,7 \text{ A}$ maka dapat diketahui daya semu (S) pada primer trafo Δ sebagai berikut:

$$S_{\Delta} = \sqrt{3} \cdot V_{L-L} \cdot I_{d1}$$

$$S_{\Delta} = \sqrt{3} \cdot 150000 \cdot 2227,7$$

$$S_{\Delta} = 587,7 \text{ MVA}$$

$$\bar{S}_{\text{Total}} = \bar{S}_Y + \bar{S}_{\Delta}, \quad \text{dengan} \quad \bar{S}_Y + \bar{S}_{\Delta} \text{ berbeda } 30^\circ.$$

$$\bar{S}_{\text{Total}} = \sqrt{587,7^2 + 587,7^2 + 2 \cdot (587,7)^2 \cdot \cos(30^\circ)}$$

$$\bar{S}_{\text{Total}} = 1118 \text{ MVA}$$

Dari nilai $\bar{S}_{\text{Total}} = 1118 \text{ MVA}$ maka dapat diketahui faktor daya ($\cos \varphi$) trafo 150kV/20kV sebagai berikut:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\bar{S}_{\text{Total}}}$$

$$\cos \varphi = \frac{995,5}{1118}$$

$$\cos \varphi = 0,89$$

SIMPULAN

1. Dari perhitungan perancangan untuk menghasilkan tegangan transmisi DC sebesar 350 kV dengan daya 1000 MW memerlukan sudut picu (α) sebesar $30,244^\circ$ untuk *rectifier* dan β sebesar $30,682^\circ$ untuk *inverting*.
2. Dari perhitungan perancangan diperoleh faktor daya ($\cos \varphi$) untuk trafo 20kV/150kV sebesar 0,894 dan ($\cos \varphi$) untuk trafo 150kV/20kV sebesar 0,89.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bradley, D. A. 1988. *Power Electronics*. UK: ELBS.
- [2] Chapman, J. S. 1985. *Electric Machinery Fundamentals*. New York: Tata McGraw-Hill.
- [3] Rasyid, Muhammad. 1993. *Elektronika Daya*. Jakarta: Prenhallindo.
- [4] Sen, PC. 1987. *Power Electronics*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- [5] Stevenson, W. D. *Elements of Power System Analysis*. 3rd Ed.